

А.В. Бармин, О.Ю. Жильцова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕТАЛЛОВЕДЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ

Металловедение – наука, изучающая связь между составом, строением и свойствами металлических материалов, закономерности их изменений при механических, тепловых, химических и др. видах воздействия. Это научная основа получения металлических материалов с разнообразными механическими, физическими и химическими свойствами⁷⁶.

В настоящее время металловедение является очень важным и приоритетным направлением науки и техники, так как разработка новых металлических материалов напрямую связана с исследованием структуры и фазовых превращений в металлических материалах при различных условиях, в том числе при получении материала (детали), его испытаниях и в конечном итоге при эксплуатации. Исследования в области металловедения осуществляются с помощью научных методов как теоретического, так и эмпирического уровней. Одним из таких методов является моделирование.

Моделирование как общенаучный метод познания прошло огромный исторический период в своем становлении, развитии и практическом применении: с античной эпохи до настоящего времени. Моделированием называется замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах «объекта-оригинала» с помощью «объекта-модели» путем проведения экспериментов с его моделью. Если результаты моделирования подтверждаются и могут служить основой для прогнозирования процессов, протекающих в исследуемых объектах, то говорят, что модель адекватна объекту. При этом адекватность модели зависит от цели моделирования и принятых критериев⁷⁷.

В рамках моделирования осуществляются такие «этапы-уровни» научного познания, как: переработка поступающей информации о явлениях и объектах в форме соответствующих им образов; построение «объекта-модели», подобной «объекту-оригиналу»; выявление зависимостей между этими моделями через их соотношение.

В развитии практически любой области человеческой деятельности математика оказывала и оказывает существенное влияние. Роль математики складывалась исторически и зависела от двух факторов:

⁷⁶ Металловедение // Большой энциклопедический словарь. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Большая Российская Энциклопедия, 1998. С.722.

⁷⁷ Ветерников С.А., Бармин А.В. Современные аспекты математического моделирования // История науки и техники и университетское образование. Сборник материалов научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов УрФУ им. первого президента России Б.Н.Ельцина. Екатеринбург – Москва. 30 мая 2011. Екатеринбург: УМЦ УПИ. 2011. С.91

степени развития математических понятий и математического аппарата, а также глубины знания об изучаемом объекте. Математическое знание используется во всех сферах человеческой жизнедеятельности⁷⁸.

В настоящее время происходит оформление методологических основ математического моделирования в различных сферах общественной жизнедеятельности, в том числе в металлургии и металловедении. Математические понятия являются своеобразным отражением свойств исследуемых объектов (предметов, явлений и процессов), а их отношения могут быть описаны в форме математических законов и структур, что в совокупности создает математические модели изучаемых объектов.

Под математическим моделированием, в узком смысле слова, понимают описание в виде уравнений и неравенств реальных физических, химических, технологических, биологических, экономических и других процессов. Для того чтобы использовать математические методы для анализа и синтеза различных процессов, необходимо уметь описать эти процессы на языке математики, то есть описать в виде системы уравнений и неравенств⁷⁹.

В научных исследованиях в зависимости от параметров могут использоваться различные математические модели. К постоянным параметрам математических моделей относятся величины, функции, скаляры, векторы, тензоры различных рангов и т.д. К неопределенным параметрам относятся детерминированность, стохастичность, случайность, интервальность и др. Кроме этого математические модели могут быть аналитическими и алгоритмическими, одномерными, двумерными и трехмерными, разной размерности, а также нестационарными и стационарными, динамичными и квазистатическими. Активное использование аналитических методов объясняется созданием пакетов математических вычислений (Derive, MatLab, Mathcad, Maple, Mathematica и др.)⁸⁰. Математическое моделирование, интегрируя достижения таких научных отраслей, как прикладная математика, информатика, инженерная графика, физика, биология и других, создает возможность решения с помощью математического аппарата как фундаментальных, так и прикладных задач в любой сфере, в том числе в металловедении и металлургии.

В настоящее время математическое моделирование осуществляется с помощью компьютерной техники, что позволяет перерабатывать огромный объем информации по металлургическим процессам и агрегатам. Созданная математическая модель становится основой для разработки программы компьютерного моделирования. Математическое моделирование находит применение в различных металлургиче-

⁷⁸ Там же. С. 90

⁷⁹ Там же. С. 93

⁸⁰ <http://bestmetallurg.narod.ru/index.html>

ских процессах. Metallургические процессы относятся к классу сложных и взаимно связанных объектов, имеющих большое количество элементов с перекрестными связями. Эта специфика должна учитываться в математических моделях.

Моделирование процессов обезуглероживания стали включает анализ алгоритма этого процесса и выбор оптимальных условий взаимосвязи режима окисления углерода и температурного режима плавки стали. Моделирование и оптимизация процесса оборота литейных материалов производится с целью существенного повышения экономической эффективности металлургического производства. Создаются математические модели динамики содержания вредных примесей и физической деградации компонентов по циклам оборота материалов в зависимости от степени освежения оборотного продукта с помощью добавок.

Моделирование литейных объектов осуществляется с помощью уравнений математической физики. Особенности моделирования процессов непрерывного (полунепрерывного) литья включают в себя схемы построения сеток, алгоритм моделирования методом конечных разностей, формирование матриц теплопроводности, демпфирования и вектора тепловой нагрузки при использовании метода конечных элементов.

Определение оптимального состава плавильных шихт, обеспечивающих содержание химических элементов в заданных пределах с учетом их пригара и угара, происходит в рамках оптимизационного моделирования литейных объектов.

Компьютерное моделирование используется для создания оптимизирующих моделей различных технологических процессов и оборудования в металлургии, прежде всего благодаря достижениям металловедения. Развитию науки о твердых металлах предшествовало развитие кристаллографии и минералогии. Минералы, являясь природными образованиями, были широкодоступны людям во все времена. Их разнообразное использование и узнавание их свойств в повседневной практике способствовало появлению науки о минералах. В исследовании минералов и металлов имеется много общего, и поэтому знания, полученные в минералогии, часто оказывали существенную помощь металловедению.

XIX в. ознаменовался бурным развитием естественных наук – химии, физики и механики. Металловедение, ранее занимающееся исключительно проблемами твердого тела, существенно расширило сферу своих интересов. Вклад металловедения в развитие многих фундаментальных дисциплин стал весьма весомым.

Большинство достижений в области металловедения вытекало из практических наблюдений на металлургических предприятиях, и было

обусловлено быстрым развитием новых методов получения стали, в частности методов Бессемера-Келли и Сименса-Мартена. Несмотря на то, что еще английский металлург Б.Хантсман в 1740 г. занимался выплавкой стали в тигле, широкое производство дешевой стали двумя упомянутыми методами начало развиваться только во второй половине XIX в.

Исследования в области минералогии и кристаллографии оказывали значительное влияние на развитие металловедения. В 1830 г. немецкий учёный, профессор минералогии И.Ф.Гессель продемонстрировал 32 класса кристаллов. В 1849 г. французский математик, физик, метеоролог и кристаллограф О.Бравэ сделал вывод в возможности существования 14-ти трансляционных решеток. В кристаллографии с 1839 г. начали применять индексы английского ученого В.Миллера, которые использовались также в областях, тесно связанных с физическим металловедением, например в работе Ройша, опубликованной в 1867 г., посвященной исследованию линий скольжения и двойникования в минералах⁸¹.

В конце XIX в. российский кристаллограф, минералог и математик Е.С.Федоров (1891), немецкий математик А.М.Шенфлиц (1891) и английский физик и математик П.Барлоу (1894) независимо друг от друга развили теорию совершенной кристаллической решетки, которая привела к установлению 230 пространственных «федоровских групп» – максимально возможного числа способов расположения атомов в трехмерном пространстве. Полное экспериментальное подтверждение этого было получено только в XX в., когда был открыт и развит метод дифракции рентгеновских лучей. Теоретическое обоснование существования пространственных групп послужило значительным толчком в развитии кристаллографии⁸².

Исследования металлов под микроскопом впервые были начаты выдающимся русским горным инженером, учёным-металлургом, крупным организатором горнозаводской промышленности П.П.Аносовым, который в 1841 г. изучал под микроскопом образец дамасской стали, покрытый водой и опубликовал фундаментальный труд «О булатах». Результатом его работы стало создание травителей. Дж. Р. фон Фукс в 1851 г., анализируя поверхности сколов железа, пришел к выводу, что оно имеет кубическую или ромбоэдрическую симметрию. Работы английского естествоиспытателя Г.К.Сорби в середине XIX в. осуществили революцию в физическом металловедении того времени. Будучи петрографом, он применил методы петрографии к исследованию стали: делал тонкие срезы (что не является необходимым), полировал их, травил и делал зарисовки. Первые его фотогра-

⁸¹ Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. М.: Мир, 1978. С.337

⁸² Сидорин И.И. Указ. соч. С.32

фии при девятикратном увеличении были сделаны в 1864 г., однако его работа не была опубликована вплоть до 1887 г. В дальнейших исследованиях он использовал большее увеличение; он наблюдал и впервые описал «составляющие перлы», перлит (позднее так названный Хоу). Сорби установил, что перлит является структурой, образованной при распаде гомогенной высокотемпературной фазы, причем его образование подавляется при закалке.

Таким образом, он совершенно отчетливо выявил наличие аллотропии в сталях, сравнивая ее с установленной ранее аллотропией иодида серебра. Он наблюдал ферритную структуру в доэвтектоидных сталях, которая была сходной со структурой, выявленной А. фон Видманштеттом (директором австрийского кабинета промышленных изделий) в Аграмском метеорите в 1808 г. Основная цель работ, последовавших вскоре за исследованиями Сорби, сводилась к выяснению возможности обнаружения в сталях после травления при соответствующем увеличении структур, сходных с метеоритными фигурами Видманштетта. До опубликования работ российского металлурга Д.К.Чернова и немецкого ученого Э.Мартенса в печати о полученных результатах ничего не сообщалось⁸³.

В 1878 г. в Германии профессор Мартенс начал металлографические исследования, включающие наблюдение поверхности излома, разработку методов полировки и травления и изучение микроструктуры сплавов. Эти исследования привели к появлению работы немецкого ученого-металлурга Г.Веддинга (1885), которая помогла на время возобновить интерес к работам Сорби, но затем он опять полностью пропал⁸⁴.

В XIX в. существенно возрос интерес к природе стали. Немецкий физик Г.Карстен в 1827 г. выделил из мягкой стали карбид, который, как доказал в 1888 г. немецкий химик Ф.Абель, является соединением Fe_3C . Значительное оживление в изучении стали началось с момента выявления Д.К.Черновым наличия подлинной аллотропии железа и связанных с ней критических точек. В 1861 г. Чернов опубликовал свою классическую экспериментальную работу, в которой показал, что сталь нельзя закалить до тех пор, пока она не будет нагрета выше определенной «критической» температуры. Дальнейшие успехи теории термообработок определялись, в первую очередь, результатами металлографических исследований и введением правила фаз.

В конце XIX в. начали изучать природу пластической деформации металлов и ее связь с кристаллографией. Особенно важное значение имело открытие Эвинга и Розенхайна в 1899 г. того, что металлы – в данном случае олово – деформируются путем взаимного скольжения

⁸³ Кан Р.У., Хаазен П.Т. Указ соч. С.18.

⁸⁴ Штейнберг С.С. Указ. соч. С.14.

различных частей кристалла по кристаллическим плоскостям (плоскостям скольжения), которые, как было обнаружено, пересекаются между собой. Это наблюдение явилось первым важным шагом на пути выяснения природы процесса деформации в металлах⁸⁵.

Исследованию механических свойств металлов стали уделять значительно большее внимание потому, что бурно развивающаяся промышленность нуждалась в новых материалах. В 1822 г. Томас Тредгольд, основываясь на работе Юнга, опубликовал трактат по испытанию материалов. В то время началось широкое строительство железных мостов, и это привело в первую очередь к необходимости изучения поведения балок под напряжением и к необходимости контроля напряжений в каркасных конструкциях. Основные требования к методам испытания материалов были сформулированы и обоснованы к 1870 г. Механические испытания привели к открытию нового явления – деформационного старения, которое впервые было обнаружено Кентом. Он заметил, что холодная обработка понижает предел упругости, сдвигает предел текучести и связанное с ним удлинение, а последующее старение восстанавливает их. Мартенс в 1890 г. обнаружил явление синеломкости в стали.

Теория пластичности, однако, еще долгое время оставалась загадкой. Для ее создания пытались применять различные феноменологические теории, основанные на принципах вязкого течения. Вопрос о природе пластичности до сих пор является неразрешенным и даже спорным. Исследования, которые проводились главным образом инженерами-испытателями, носили в большинстве своем чисто описательный характер и опирались на весьма примитивные теории. Об упругих и пластических свойствах отдельного зерна в поликристалле было известно очень мало, практически ничего. Рассматривая различные события XIX в., можно отметить, что многие открытия в завуалированном виде представляли собой отправные точки, из которых в следующем веке было возведено физическое металловедение.

В XIX в. начали быстро появляться новые и модифицированные сплавы. Английские ученые М.Фарадей и Дж.Стодарт в 1820 г. изготовили несколько сплавов путем отжига скрученных проволочек из различных металлов, а именно из железа и платины. Французский ученый Г.Бертье в 1820 г. получил сплавы железа и хрома и мог бы стать действительно знаменитым. Вольфрамовая сталь впервые была получена Якобом в 1857 г. в Австрии. Муше разрабатывал вольфрамовые стали и исследовал стали, закаленные на воздухе. Однако наибольшим достижением явилась разработка в 1871 г. английским

⁸⁵ Кристиан Дж. Указ. соч. С.342.

металлургом Р.Гадфильдом марганцевых и кремниевых сталей, что открыло эпоху легированных сталей⁸⁶.

К началу XX в. физическое металловедение сформировалось и окрепло. Начался наиболее интересный период развития физического металловедения. В начале этого периода возросло значение университетских металлургических факультетов; через некоторое время промышленность проявила свою заинтересованность в проведении более серьезных исследований, и наконец, занятие физическим металловедением стало одной из важнейших профессий.

В начале XX в. на передовые позиции вышла «Школа Таммана» в Геттингенском университете. Немецкий физико-химик Г.Тамман вдохнул истинно научный подход в физическое металловедение, добавил фундаментальную информацию во многие ее разделы. Он предпринял широкое изучение строения металлических систем главным образом с целью выяснения основных правил строения сплавов и природы фаз в них. В результате было получено огромное количество фазовых диаграмм⁸⁷.

В начале было много сомнений относительно того, все ли металлы обладают кристаллической структурой. Вопрос этот оставался открытым вплоть до открытия немецкого физика М. фон Лауэ в 1912 г. дифракции рентгеновских лучей и последующего за этим открытия английского физика У.Г.Брэгга в 1914 г. Метод начал незамедлительно использоваться и произвел революцию в физике твердого тела. Вскоре были определены элементарные ячейки всех известных и многих промежуточных фаз в сплавах.

Немецкий ученый Р.Кремман в 1931 г. установил, что жидкие растворы металлов могут подвергаться электролизу. Кубашевский применил электролиз к исследованию твердых растворов и обнаружил, что в аустените углерод движется к катоду, т. е. твердые растворы эффективно ионизируются⁸⁸.

В это время развитие промышленности происходило по многим направлениям. В результате алюминий стал доступным металлом. Появились новые сплавы, например: аустенитная нержавеющая сталь (немецкий ученый Б.Штраус, 1910) и ферритная нержавеющая сталь (английский ученый Г.Бреарли, 1912). Были изобретены и разработаны новые процессы и оборудование для прокатки стали такие, как например, непрерывный прокатный стан.

Испытание металлов в начале XX в. стало носить все более научно обоснованный характер. В 1900 г. шведский инженер, металлург, автор работ по металлургии стали и определению твердости металлов и сплавов Ю.А.Бринель изобрел склерометр, носящий теперь

⁸⁶ Там же. С.302

⁸⁷ Кан Р.У., Хаазен П.Т. Указ. соч. С.22

⁸⁸ Сидорин И.И. Указ. соч. С.30

его имя. Изод (1903) и М. Шарпи (1904) создали испытательный копер. Было обнаружено резкое уменьшение энергии ударного излома в сталях при температуре, близкой к комнатной. Появилось много данных по усталости металлов – было изобретено оборудование для новых и более быстрых испытаний на усталость. В справочниках появилось много сведений по различным методам испытаний.

В этот период вновь обратили внимание на давние наблюдения того факта, что холодная обработка упрочняет металлы. Особое внимание на это обратил Беилби в 1911 г. при развитии «теории аморфного металла». Он считал, что холодная обработка (любого вида, включая полировку) переводит металлы в аморфное и более стабильное состояние. В 1913 г. австрийский металлург В.Розенхайн расширил теорию Беилби, постулируя наличие слоя аморфного металла на границах зерен⁸⁹.

Старение было открыто немецким инженером А.Вильмом чисто случайно в 1906 г. Он закаливал сплав Al–Cu–Mg–Mn, надеясь, что, как в стали, это приведет к упрочнению сплава, но опыт не удался. После длительного уикенда Вильм продолжил измерения, и они действительно показали значительное упрочнение сплава. Это любопытное явление старения оставалось необъясненным до тех пор, пока в 1919 г. американские исследователи Мерики, Вальтенберг и Скотт не обнаружили уменьшение растворимости Cu в Al с температурой и предположили, что старение являлось замедленным процессом образования зародышей новой фазы, которую с помощью микроскопа в то время не могли обнаружить⁹⁰.

Началось интенсивное изучение известного уже длительное время деформационного старения в низкоуглеродистых сталях; это явление имеет очень важное значение в промышленности, особенно при производстве листовой стали. Были разработаны и изготовлены стали с пониженной склонностью к деформационному старению.

Все возрастающий объем знаний в области оптики элементарных частиц привел к созданию некоторых новых и необычных исследовательских приборов. Полевой ионный микроскоп (ионный проектор), созданный немецким физиком и изобретателем Э.Мюллером в 1936 г., давал возможность «видеть» атомы на поверхности металла, наблюдать атомы на границах зерен, «видеть» вакансии и дислокации. Долгое время одной из нереализованных возможностей микроскопии являлось определение химического состава микроскопических областей. Эта мечта оказалась воплощена в жизнь французским ученым Р.Кастеном в 1956 г. при изобретении микроанализатора – прибора, дающего сведения о составе области площадью 1 мкм². Кроме того, с точки зрения

⁸⁹ Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: МИСИС, 1999. С.160

⁹⁰ Там же. С.223.

физического металловедения, электронный микроскоп помог разрешить наиболее сложные из всех существующих разногласий.

Пластичность металлов являлась областью наиболее активных исследований, поскольку в руках ученых появился метод просвечивающей электронной микроскопии, открывающей широкие возможности по изучению дефектов внутреннего строения. Хирш и его сотрудники в результате своих экспериментов сумели доказать, что созданный ими микроскоп позволяет наблюдать поведение дислокаций во всех деталях. Результаты, получаемые с помощью этого метода, который применяется в настоящее время большим числом исследователей во всем мире, весьма существенны. Отдельные дислокации наблюдались и раньше, а их передвижение в металлах рассматривалось как передвижение путем скольжения. Используя электронный микроскоп, можно наблюдать частичные дислокации Хайденрайха и Шокли (1948) и связанные с ними дефекты упаковки; соответствующий анализ рассеяния электронов позволил создать метод определения важного параметра дислокаций – вектора, описанного Бюргерсом (1939)⁹¹.

Стремительное развитие физического металловедения во второй половине XX в. обязано многочисленным новшествам в области оборудования. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), предназначенная для металловедческих целей, была разработана Хиршем и его сотрудниками в то время, когда они занимались изучением дислокаций в деформированных металлах. Вначале этот метод в основном использовался для исследования металлов при холодной обработке, рекристаллизации и дефектов кристалла. Однако по мере усовершенствования метода, особенно когда ПЭМ стала использоваться совместно с локальным химическим анализом, его стали все чаще применять для исследования фазовых переходов всех видов – в этой широкой области исследования указанный метод значительно потеснил оптическую микроскопию. Аналитическая просвечивающая растровая электронная микроскопия (ПРЭМ), разработанная в конце 70-х гг. XX в., еще больше усилила эту тенденцию.

В течение 70-х гг. XX в. было разработано и доведено до широкого применения много других приборов, сочетающих наглядность изображения с аналитической способностью. К ним относятся вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС), электронная оже-спектрометрия (ЭОС), электронная спектроскопия для химического анализа (ЭСХА), также называемая рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией, и в частности разработанный Мюллером полевой ионный микроскоп (ионный проектор), скомбинированный с масс-спектрометром, основанный на определении времени пролета частиц. Все эти методы, обеспечивающие ионно-лучевую эрозию, могут быть

⁹¹ Там же. С.223.

использованы для определения составов очень мелких объектов, порядка микрона и менее. Возможность методов ПЭМ, ПРЭМ, РЭМ, ВИМС, ЭОС, ЭСХА и автоионной микроскопии произвели революцию в изучении микроструктуры и микроградиентов состава при высоком разрешении. Собранные вместе, они явились таким же значительным импульсом в развитии физического металловедения, как некогда дифракция рентгеновских лучей⁹².

История математического моделирования в металловедении и металлургии имеет богатые традиции в России. Для объекта моделирования в металловедении и металлургии наиболее существенными являются физико-химические процессы, составляющие основу той или иной технологии. Таким образом, модели металлургических процессов и объектов в первую очередь включают описания химических взаимодействий, сопровождающие эти взаимодействия явления тепло- и массопереноса, гидродинамические особенности работы, теплообменные процессы.⁹³

В современной металлургии, в том числе и в отечественной, активно ведутся научные разработки эффективных и оптимальных технико-технологических решений, как в управлении, так и в проведении металлургических процессов; как в совершенствовании технологий, так и в создании новых металлургических агрегатов.

Под руководством российского и советского изобретателя, инженера-металлурга Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло (1864 – 1928), возглавлявшего кафедру теории стали и печей в Уральском индустриальном университете в 20-е гг. XX в., были созданы проекты различных нагревательных печей – методических (для нагрева слитков перед прокаткой), кузнечных (для термической обработки металлов), сушильных, отжигательных и мартеновских⁹⁴. Ученым был разработан атлас «Плазменные печи» (1925)⁹⁵, который на Всемирном конгрессе во Франции в 1926 г. получил всемирное признание.

Одним из основателей металлургической теплотехники как науки, организатором выпуска специалистов в области газопечной теплотехники был советский ученый, инженер-металлург Глинов Марк Анатольевич (1906 – 1975). Он работал в УПИ и МИСиС. Участвовал в создании общей теории печей, усовершенствовании конструкций и тепловых режимов мартеновских печей. Глинов является одним из авторов сталеплавильного агрегата непрерывного действия⁹⁶.

⁹² Там же. С.213

⁹³ Агеев Н.Г. Конспекты лекций по курсу «Моделирование процессов и объектов в металлургии». Екатеринбург, УГТУ – УПИ, 2009. С.16

⁹⁴ <http://ru.wikipedia.org/wiki/EOF7>

⁹⁵ Грум-Гржимайло В.Е. Пламенные печи. В 3-х томах. М.: Изд. Теплотехн. ин-та. 1925.

⁹⁶ Кафедра теплофизики и информатики в металлургии УрФУ // <http://tim.ustu.ru/index.php/istoriya/o-kafedre>

и новых металлургических процессов и агрегатов на принципах самоорганизации». В ее состав входят: С.П.Мочалов, С.Н.Калашников, К.М.Шакиров; А.Г.Падалко, В.Н.Буинцев, И.А.Рыбенко, В.И.Кожемяченко, С.Ю.Красноперов, Л.А.Ермакова. На основе математических моделей в 70 – 80-е гг. XX в. впервые в металлургии были разработаны тренажеры «Сталевар», «Конвертерщик» и др., которые внедрены во многих учебных заведениях и заводах России, Украины и Казахстана, а с 1986 г. было взято направление на разработку обучающих систем для персональных ЭВМ, а затем – на разработку электронных учебников¹⁰¹.

Новым в мировой металлургии в 80 – 90-е гг. XX в. стало создание направления «Математические модели и новые металлургические процессы на основе принципов самоорганизации» по инициативе профессора В.П.Цымбала. Был разработан и доведен до реализации в виде опытной установки на Западносибирском металлургическом комбинате в Новокузнецке принципиально новый непрерывный металлургический процесс и агрегат типа СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор).

Преимуществами процесса и агрегата типа СЭР являются: высокие скорости тепломассообменных процессов (в 100 – 200 раз выше, чем в конвертере); малые размеры и материалоемкость агрегатов (в 10 – 20 раз меньше, чем в традиционной металлургии); низкие сквозные энергозатраты (13 – 15 ГДж/т); высокая экологичность и безотходность технологий, использование в шихте различного рода пылевидных материалов и отходов; управляемость, универсальность, мобильность; возможность выплавки различных металлов и реализации новой концепции создания мини-заводов и структурных изменений в металлургии. Процесс и агрегат были запатентованы в большинстве металлопроизводящих стран мира¹⁰². В 1995 г. на комбинате была получена первая трубная заготовка МНЛЗ, а в 2005 г. был сдан в эксплуатацию двухпозиционный агрегат печь-ковш для внепечной обработки металла перед разливкой на двух МНЛЗ.

В настоящее время в России продолжают работы по созданию математических моделей и программных и инструментальных систем для разработки новых металлургических технологий и совершенствование учебных процессов, в том числе и металловедения. Создаются комплексы математических моделей и автоматизированных систем проектирования и создания новых синергетических металлургических процессов и агрегатов и их обслуживания. Это позволяет решать зада-

¹⁰¹ Научные школы СибГИУ. Научная школа «Математическое моделирование, создание прикладных инструментальных систем и новых металлургических процессов и агрегатов на принципах самоорганизации» <http://library.sibsiu.ru/ScienceSchools/MatematicheskoeModelirovanieSozdaniePrikladnyhInstrumentalnyhSistemInovyhMetallurgicheskikhProcessovIAgregatovNaPrincipahSamoorganizacii.asp>

¹⁰² Там же

чи обеспечения стойкости агрегатов с утилизацией тепла, большой экономии огнеупоров, исключение выбросов газа из металлургического агрегата, превращая их с помощью каталитического синтеза в экологически чистое моторное топливо.

Формирование металловедения как науки происходило как на теоретическом, так и на прикладном, практическом уровнях. Содержанием прикладного (технического) металловедения является изучение состава, структуры, процессов обработки и свойств различных конкретных классов металлических материалов (например, железоуглеродистых сплавов, конструкционной стали, нержавеющей стали, жаропрочных сплавов, алюминиевых сплавов, магниевых сплавов, металлокерамики). В связи с развитием новых областей техники возникли задачи изучения поведения металлов и сплавов при радиационных воздействиях, весьма низких температурах, высоких давлениях и т.д.¹⁰³.

Таким образом, математическое моделирование как промышленных процессов, так и технологических, научных и лабораторных исследований при планировании экспериментов становится важным в развитии металлургии и металловедения.

¹⁰³ Металловедение // <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse>